

DEMOSTRACIÓN DE UN SENSOR DE GAS METANO BASADO EN UN SISTEMA DE ACOPLO DE MÚLTIPLES SECCIONES DE FIBRA DE CRISTAL FOTÓNICO

Ana M. Cubillas⁽¹⁾, Jose M. Lazaro⁽¹⁾, Olga M. Conde⁽¹⁾, Marco N. Petrovich⁽²⁾, Angel Ullan⁽¹⁾
y Jose M. Lopez-Higuera⁽¹⁾.

cubillasam@unican.es, lazarojm@unican.es, olga.conde@unican.es, mnp@orc.soton.ac.uk, angel.ullan@unican.es,
lopezhjm@unican.es

⁽¹⁾Grupo de Ingeniería Fotónica, Dept. TEISA, Universidad de Cantabria, 39005, Santander, Cantabria, España

⁽²⁾Optoelectronics Research Centre, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, Reino Unido

Abstract—Hollow-core photonic bandgap fibres (HC-PBFs) have been recently demonstrated as a powerful technology in the field of gas sensing. The long interaction path lengths available with these fibers are advantageous for the detection of weakly absorbing gases such as methane. However, long path lengths also yield to very high insertion times of the gas into the fiber. In this paper, a novel solution based on a multicoupling gap system to detect methane with HC-PBFs is proposed. For that purpose, a conventional configuration using one long piece of HC-PBF is compared to this novel method, which uses shorter pieces of HC-PBF with the same overall length as the previous configuration. The results and conclusions from experimental studies are presented and discussed. The multicoupling gap system is demonstrated to considerably reduced the filling time while maintaining the sensitivity, proving the feasibility of the configuration proposed.

I. INTRODUCCIÓN

Los sensores de gases han experimentado una creciente importancia en los últimos años que atiende a una mayor concienciación medioambiental de la sociedad [1]. Además, la detección de gases es también esencial en otros ámbitos como en la industria, en entornos domésticos, en biomedicina, etc. [2]. En la mayoría estas aplicaciones se requiere detectar la concentración de un determinado gas en tiempo real, a distancia, con gran sensibilidad y con un coste de mantenimiento mínimo. En este sentido, los sistemas basados en espectroscopía de absorción óptica constituyen una firme apuesta para responder satisfactoriamente a estas demandas. Este tipo de sensores se basa en la propiedad que tienen los compuestos gaseosos de absorber luz a longitudes de onda específicas de acuerdo a su estructura molecular interna [1]. Así, cada especie gaseosa posee un espectro de absorción característico que proporciona información relevante del gas, como su concentración, y que, además, le identifica de forma unívoca.

De forma general, los sensores de gases ópticos basados en espectroscopía de absorción óptica son sencillos de utilizar, son muy selectivos al gas a detectar, pueden aportar buenas

sensibilidades de detección, respuestas rápidas y precisas, bajas sensibilidades cruzadas con otros gases, ausencia de inflamabilidad, posibilidad de detección remota y un reducido coste de mantenimiento [1]. Si además se emplean guías de onda ópticas como celdas de detección de gases en los sistemas anteriores, se pueden obtener largos caminos ópticos de interacción con el gas en tamaños compactos, lo que contribuye a mejorar la sensibilidad del sistema. Hasta hace relativamente poco, los sistemas que empleaban fibras como celdas de gases ofrecían un rendimiento bastante pobre [3]. Sin embargo, la aparición de una nueva clase de fibras de cristal fotónico, denominada fibras de núcleo hueco y efecto “bandgap” (HC-PBF), ha proporcionado una forma más eficiente de explotar la interacción del gas con la luz [4].

Las HC-PBFs son una nueva clase de fibras ópticas en las que la luz se guía por medio de una estructura periódica de agujeros micrométricos, denominada microestructura, presente en el eje longitudinal de la fibra. Esta microestructura da lugar a lo que se conoce como “bandgap” fotónico, o lo que es lo mismo, a un intervalo de longitudes de onda o frecuencias en las que la luz no se puede propagar en dicha microestructura. Si se introduce un agujero de mayor tamaño en el centro de la microestructura, se crea un defecto en el que se permite la propagación de luz. Este agujero central conforma el núcleo de la fibra, donde la luz queda confinada gracias al “bandgap” fotónico de la cubierta [4].

Las HC-PBFs poseen propiedades únicas que hacen que su uso sea especialmente ventajoso en los sistemas de detección de gases. Concretamente, si se inserta gas en el núcleo hueco de estas fibras, se pueden conseguir caminos ópticos de interacción entre el gas y la luz elevados, lo que conlleva a una alta sensibilidad. A esto se le suman otra serie de ventajas como el poder realizar dispositivos compactos con ellas, pues presentan pocas pérdidas por macrocurvaturas; su facilidad de integración en montajes ópticos; su ligero peso, especialmente ventajoso en dispositivos portátiles y, lo más importante, la posibilidad de alcanzar caminos ópticos de interacción con

el gas de longitud casi ilimitada (siempre que las pérdidas de transmisión de la HC-PBF sean relativamente bajas). Por las ventajas enumeradas anteriormente, el uso de HC-PBFs como celdas de gases es un tema que ha suscitado un gran interés en la comunidad científica en los últimos años. Así, entre sus aplicaciones se incluye la detección de gases [5], [6], experimentos de espectroscopía de alta resolución [7], [8], sistemas de referencia en comunicaciones ópticas [9] y óptica no lineal [10].

Para la implementación práctica de un sensor de gases basado en HC-PBF, es necesario solventar uno de sus problemas más importantes, que es el largo tiempo requerido por el gas para difundirse por el interior del pequeño núcleo de las fibras [11]. Por eso, en este trabajo se demostrará la viabilidad de una configuración alternativa al montaje tradicional basada en un sistema de acoplo de múltiples secciones de HC-PBF.

II. SISTEMA DE ACOPLO DE MÚLTIPLES SECCIONES DE FIBRA DE CRISTAL FOTÓNICO

Para acelerar el proceso de llenado de las HC-PBFs, y así mejorar el tiempo de respuesta de los sensores de gases basados en esta tecnología, se han propuesto diversas soluciones. La primera de ellas consiste en realizar aberturas o microcanales de entrada adicionales del gas a lo largo del eje longitudinal de la fibra, que conecten la superficie exterior de la fibra con su núcleo hueco [11], [12]. Aunque este método consigue acelerar el proceso de difusión del gas en la fibra se trata, sin embargo, de una técnica que daña en gran medida la estructura de la fibra, al modificar la microestructura periódica de la cubierta. Además, el tamaño de los canales realizados es tan sólo del orden de $1.5 \mu\text{m}$, lo que tampoco contribuiría a reducir significativamente los tiempos de inserción del gas [13].

Por estas razones, la propuesta alternativa que se expone a continuación se aventura como una solución más interesante. Ésta consiste en dividir la longitud total de la HC-PBF en secciones de menor longitud, L_{sec} , acopladas en serie y con una pequeña separación entre ellas, d_{gap} (véase la Fig. 1). Esta solución viene motivada por estudios previos que demuestran que el tiempo de difusión del gas en la fibra aumenta exponencialmente con la longitud de la misma [11], [13].

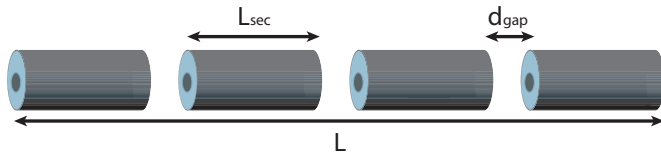


Fig. 1. Sistema propuesto de acoplo de secciones de fibra de inferior longitud a la inicial para reducir el tiempo de difusión del gas.

Para que la solución planteada sea viable, es necesario cuantificar las pérdidas introducidas por el acoplo de las distintas secciones de fibra y que dependerán de la separación

existente entre ellas, d_{gap} . Las pérdidas por acoplo entre fibras en función de su separación han sido estudiadas teórica y experimentalmente [13] y se ha encontrado que el valor óptimo de d_{gap} se corresponde con el radio del núcleo de la fibra. Esto supone unas pérdidas por acoplo de sección inferiores a los 0.1 dB, valor bajo que favorece la implementación de esta propuesta.

III. DEMOSTRACIÓN EXPERIMENTAL

A. Descripción y características de la HC-PBF

Para detectar gas metano se escogió su banda del infrarrojo cercano $\nu_2 + 2\nu_3$, centrada en $1.3 \mu\text{m}$, por coincidir con la segunda ventana de telecomunicaciones y disponer, por ello, de una gran variedad de fuentes de luz y detectores con grandes prestaciones a bajo coste.

La HC-PBF usada en los experimentos fue proporcionada por el Optoelectronics Research Centre de la Universidad de Southampton (Reino Unido) y fue diseñada especialmente para detectar dicha banda del gas. Una imagen obtenida con un microscopio electrónico de barrido de la sección eficaz de la HC-PBF empleada, donde se muestra en detalle el núcleo y la microestructura circundante de la fibra, se incluye en la Fig. 2. Los parámetros estructurales de esta fibra son: diámetro total de $188 \mu\text{m}$, núcleo hueco formado por la omisión de 7 celdas centrales en la microestructura y diámetro de núcleo de $10.3 \mu\text{m}$. Además, según especificaciones, la potencia guiada en el núcleo es superior al 95%.

Por otro lado, se realizó una medida del ancho de banda de guiado de la HC-PBF con un analizador de espectros ópticos (OSA, Optical Spectrum Analyzer), Agilent 86142A, y una fuente de luz blanca de LEDs (Light-Emitting Diode), Agilent 83437A. Como resultado, se estimó que el ancho de banda de la HC-PBF para una caída de 3 dB es, aproximadamente, de 1220-1380 nm, con unas pérdidas alrededor de 100 dB/km en ese rango.

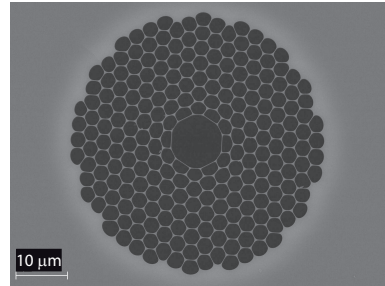
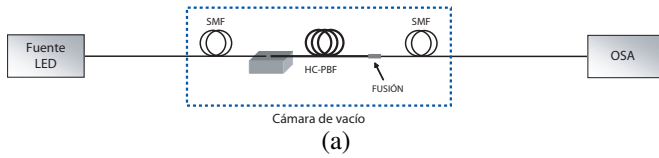


Fig. 2. Sección eficaz de la HC-PBF empleada en los experimentos de detección de metano en la banda de $1.3 \mu\text{m}$.

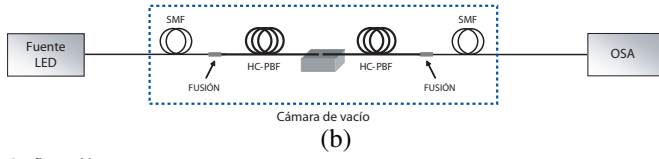
B. Montaje experimental

Para demostrar la viabilidad de la propuesta anterior, se realizó el montaje que se muestra en la Fig. 3. La primera parte del experimento consistió en emplear un montaje tradicional con un único trozo de HC-PBF de gran longitud como celda de detección de gases. Para ello, se empleó una única sección de 4.90 m de longitud de la HC-PBF presentada anteriormente,

Configuración 1



Configuración 2



Configuración 3

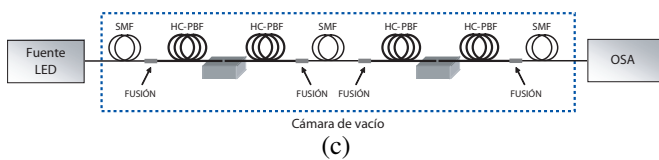


Fig. 3. Montaje experimental (a) Configuración 1, con una sección de HC-PBF de 4.90 m. (b) Configuración 2, con dos secciones de HC-PBF de 2.45 m cada una. (c) Configuración 3, con cuatro secciones de HC-PBF de 1.22 m cada una.

tal como se muestra en la Configuración 1 (Fig. 3 (a)). Para facilitar la manejabilidad del sistema, se fusionó uno de los extremos de la fibra a un latiguillo de fibra monomodo (SMF, Single Mode Fiber). El otro extremo de la HC-PBF se acopló a otro latiguillo de SMF mediante una ranura en V, con una pequeña separación entre ambas, determinada de modo que las pérdidas de acoplo se minimizaran en la medida de lo posible. Además, se utilizó la fuente de luz blanca LED para inyectar luz al sistema anterior y un OSA para capturar el espectro de la intensidad transmitida.

La segunda configuración empleada, basada en el sistema de acoplo de múltiples secciones de HC-PBF, se incluye en la Fig. 3 (b). En este caso, se dividió la sección de fibra empleada en el montaje anterior en dos mitades de igual longitud, es decir, en dos secciones de 2.45 m. Para mantener las condiciones del experimento, se fusionó uno de los extremos de cada sección de HC-PBF a un latiguillo de SMF. Los extremos libres de ambas secciones de HC-PBFs se acoplaron entre sí mediante una ranura en V. De ese modo, se asegura que el tiempo de llenado venga determinado por la entrada de gas por un único extremo de cada sección de fibra.

Por último, el proceso anterior se repitió para el montaje de la tercera configuración de la Fig. 3 (c). En este montaje se emplearon 4 secciones de HC-PBFs que en conjunto constituían la celda de gases. Estas secciones fueron el resultado de dividir las fibras de la Configuración 2 en dos mitades de 1.22 m de longitud cada una. Al igual que en el caso anterior, cada sección se fusionó por un extremo a una SMF y los extremos libres de cada trozo de HC-PBF se acoplaron mediante una ranura en V, según se muestra en la figura.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

Para calcular el tiempo requerido por el gas metano en difundirse en el interior de las HC-PBFs en las distintas configuraciones, se monitorizó el valor de la transmitancia del sistema a lo largo del tiempo, ya que proporciona una idea del tiempo necesario para que se establezca la presión en el interior de las fibras.

Para facilitar la entrada de gas en las HC-PBFs, se realizó, en primer lugar, vacío en la cámara en la que estaban contenidas las fibras. Posteriormente, se inyectó en la misma una concentración de metano en aire de 18750 ppmv (partes por millón en volumen) a temperatura ambiente y presión relativa de 1 bar. Las medidas de transmitancia se realizaron en la rama Q del metano (centrada alrededor de 1331.5 nm), por ser la línea del gas que más absorción presentaba en toda la banda.

Para las distintas configuraciones de la Fig. 3, se monitorizó la caída de la intensidad transmitida en el centro de la rama Q a lo largo del tiempo, resultado de la difusión del gas en el interior de las secciones de HC-PBFs. La transmitancia del sistema se calcula como el cociente de la intensidad transmitida en el sistema y la intensidad incidente en el mismo [1]. De ese modo, se obtuvieron los datos experimentales que se muestran en la Fig. 4 en forma de puntos. En concreto, los puntos de color rojo, azul y negro representan los valores experimentales de transmitancia para la Configuración 1 (1 única sección de 4.90 m), Configuración 2 (2 secciones de 2.45 m) y Configuración 3 (4 secciones de 1.22 m), respectivamente. En la figura se puede apreciar claramente como la caída y estabilización de la transmitancia es más notable en aquellas configuraciones que emplean secciones de fibra de menor longitud, lo que viene a avalar la hipótesis de partida de la propuesta empleada.

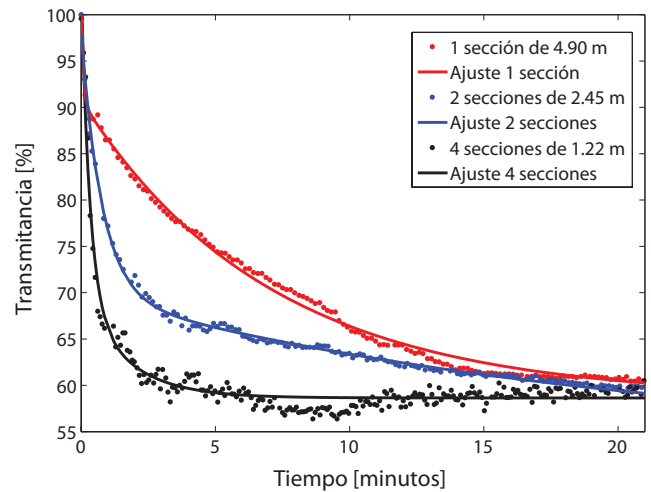


Fig. 4. Tiempo de difusión requerido por el gas en cada una de las configuraciones de la Fig. 3. Los puntos son los valores experimentales y las líneas continuas, el ajuste empírico de los mismos.

Posteriormente, se realizó el ajuste de los datos anteriores de forma empírica. A tal efecto, se empleó un modelo de doble

exponencial (1), por ser el que mejor modelaba el valor de la transmitancia en el interior de la fibra a lo largo del tiempo.

$$T(t)[\%] = a \exp(-bt) + c \exp(-dt) + e \quad (1)$$

Empleando un proceso de mínimos cuadrados no lineal, se calcularon los valores de los parámetros del modelo (a, b, c, d y e) que mejor ajustaban los datos experimentales de la Fig. 4, así como el valor del coeficiente de correlación al cuadrado, R^2 , que da una estimación de la calidad del ajuste realizado. En todos los casos, este valor fue superior a 0.95, lo que implica una gran concordancia entre el modelo y los datos experimentales. Con los modelos anteriores se realizó una estimación del tiempo necesario para que el valor de transmitancia del gas alcance el 95% del valor en estado estacionario, definido como el tiempo de difusión del gas en las HC-PBFs. Los resultados fueron de 11, 7 y 1 min, aproximadamente, para el caso de emplear 1, 2 ó 4 secciones de HC-PBF, respectivamente. Se demuestra como, efectivamente, el tiempo de llenado se reduce drásticamente a medida que se incrementa el número de secciones y, por tanto, se emplean longitudes de fibra menores.

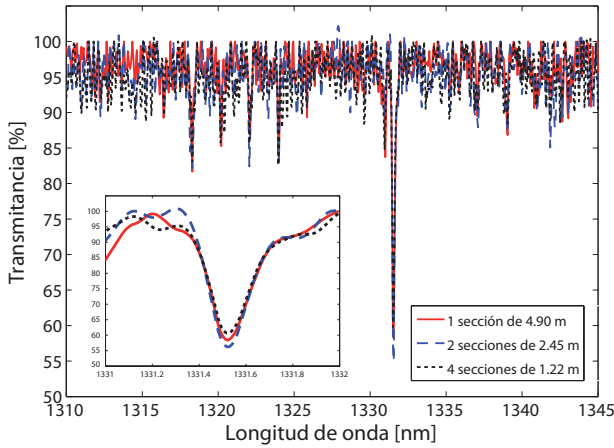


Fig. 5. Espectro del metano en la banda $\nu_2 + 2\nu_3$ para las distintas configuraciones de la Fig. 3. Detalle: Rama Q.

Por último, y para comprobar que el emplear un sistema como el propuesto no afecta significativamente a la transmisión del sistema, se midió el espectro del metano en la banda $\nu_2 + 2\nu_3$ para las distintas configuraciones. Los espectros resultantes (medidos con una concentración de metano en aire de 18750 ppmv, 1 bar de presión relativa, temperatura ambiente) se muestran en la Fig. 5. En la esquina inferior izquierda se incluye, además, el detalle de la rama Q de la banda, centrada en 1331.5 nm. Como se puede apreciar, el espectro es muy similar en todas las configuraciones, salvo por una pequeña desviación producida por el ruido. La sensibilidad para un sistema de este tipo, que emplee una longitud total de 4.90 m, se ha estimado previamente en 98 ppmv [14]. Se demuestra así como el sistema de acoplo de múltiples secciones de HC-PBF presentado en este trabajo,

reduce significativamente el tiempo de respuesta del sistema sin, prácticamente, reducir la sensibilidad del sistema.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha demostrado la viabilidad de un sensor de gas metano en el infrarrojo cercano basado en un sistema de acoplo de múltiples secciones de fibra de cristal fotónico. La nueva configuración propuesta se basa en reemplazar la celda de gases compuesta de una única sección de HC-PBF por varias secciones de HC-PBF de menor longitud, acopladas en serie y con una separación entre ellas tal que las pérdidas por acoplo sean mínimas. La conclusión más relevante de la demostración experimental de este sistema es que la configuración propuesta reduce significativamente el tiempo necesario para que el gas se difunda en la fibra y, con ello, el tiempo de respuesta del sensor, sin modificar apreciablemente la sensibilidad del mismo.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos presentados en esta comunicación han sido en parte financiados por el Ministerio Español de Ciencia e Innovación a través del Proyecto TEC2007-67987-C02-01.

REFERENCES

- [1] J. M. Lopez-Higuera. *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*. Ed. John Wiley & Sons, 2002.
- [2] MNT Gas Sensor Roadmap. Technical report, MNT Gas sensor forum, 2006.
- [3] G. Stewart, W. Jin, and B. Culshaw. Prospects for fibre-optic evanescent-field gas sensors using absorption in the near-infrared. *Sens. Act. B*, 38-39:42-47, 1997.
- [4] F. Benabid. Hollow-core photonic bandgap fibre: new light guidance for new science and technology. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 364:3439-3462, 2006.
- [5] T. Ritari, J. Tuominen, H. Ludvigsen, J. C. Petersen, T. Sorensen, T. P. Hansen, and H. R. Simonsen. Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers. *Opt. Express*, 12:4080-4087, 2004.
- [6] A. M. Cubillas, M. Silva-Lopez, J. M. Lazaro, O. M. Conde, M.N. Petrovich, and J. M. Lopez-Higuera. Methane detection at 1670-nm band using a hollow-core photonic bandgap fiber and a multiline algorithm. *Opt. Express*, 15:17570-17576, 2007.
- [7] J. Henningsen, J. Hald, and J. C. Petersen. Saturated absorption in acetylene and hydrogen cyanide in hollow-core photonic bandgap fibers. *Opt. Express*, 13:10475-10482, 2005.
- [8] A. M. Cubillas, J. Hald, and J. C. Petersen. High resolution spectroscopy of ammonia in a hollow-core fiber. *Opt. Express*, 16 (6):3976-3985, 2008.
- [9] J. Tuominen, T. Ritari, H. Ludvigsen, and J. C. Petersen. Gas filled photonic bandgap fibers as wavelength references. *Opt. Commun.*, 255:272-277, 2005.
- [10] F. Couny, P.S. Light, F. Benabid, and P. St. J. Russell. Electromagnetically induced transparency and saturable absorption in all-fiber devices based on $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ -filled hollow-core photonic crystal fiber. *Opt. Commun.*, 263:28-31, 2006.
- [11] Y. L. Hoo, W. Jin, C. Shi, H. L. Ho, D.N. Wang, and S. C. Ruan. Design and modeling of a photonic crystal fiber gas sensor. *App. Opt.*, 42:3509-3515, 2003.
- [12] A. van Brakel, C. Grivas, M.N. Petrovich, and D. J. Richardson. Micro-channels machined in microstructured optical fibers by femtosecond laser. *Opt. Express*, 15:8731-8736, 2007.
- [13] N. Gayraud, L. W. Kornaszewski, J. M. Stone, J. C. Knight, D. T. Reid, D. P. Hand, and W.N. MacPherson. Mid-infrared gas sensing using a photonic bandgap fiber. *App. Opt.*, 47 (9):1269-1277, 2008.
- [14] A. M. Cubillas, J. M. Lazaro, O. M. Conde, M.N. Petrovich, and J. M. Lopez-Higuera. Multi-line fit model for the detection of methane at $\nu_2 + 2\nu_3$ band using hollow-core photonic bandgap fibres. *Sensors*, 9 (1):490-502, 2009.